24. Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences

Steve Masson, Université du Québec à Montréal

Résumé

Certains concepts scientifiques, dont les concepts de force et de courant électrique, sont réputés être particulièrement difficiles à acquérir parce que leur apprentissage nécessite un changement conceptuel. Selon une nouvelle approche de recherche, la neurodidactique des sciences, un changement conceptuel nécessite des changements cérébraux particuliers observables à partir d'appareils d'imagerie cérébrale. Cet article a pour objectifs (1) de définir ce qu'est la neurodidactique des sciences en la situant par rapport aux autres domaines de recherche en éducation qui s'intéressent au fonctionnement du cerveau et (2) de présenter les premières découvertes de ce domaine de recherche en émergence, découvertes portant sur le rôle du conflit cognitif et des mécanismes cérébraux d'inhibition dans les processus de changement conceptuel en sciences.

Introduction

Depuis quelques années, les connaissances sur le fonctionnement du cerveau ont énormément évolué (OCDE, 2002). La décennie 1990 est d'ailleurs souvent appelée la décennie du cerveau (Geake, 2003). Grâce, notamment, à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), il est aujourd'hui possible d'étudier quelles sont les régions cérébrales impliquées dans l'exécution de tâches motrices ou cognitives. Puisque les fonctions de chacune des régions du cerveau sont de mieux en mieux connues, l'IRMf permet de comprendre davantage le type de travail cérébral impliqué dans la réalisation d'une tâche.

En éducation, les enseignants demandent constamment aux élèves de réaliser des tâches cognitives. Les élèves doivent écouter, observer, lire, écrire, compter, parler, mémoriser… En faisant réaliser à l'intérieur d'appareils d'IRMf des tâches cognitives similaires à celles demandées aux élèves en classe, il devient possible de mieux comprendre le travail cognitif en lien avec les tâches scolaires et de mieux comprendre pourquoi certains élèves éprouvent des difficultés.

En enseignement des sciences, il est reconnu que certains concepts sont particulièrement difficiles à apprendre (diSessa, 2006). Il est par exemple très difficile d'acquérir les concepts de la physique mécanique. En effet, même après un ou même plusieurs cours de mécanique, les élèves continuent à croire que, dans un monde sans friction, les objets en mouvement finissent par s'arrêter et que les objets plus lourds tombent plus rapidement (Thouin, 1996). Pourquoi cet apprentissage est-il si difficile ? Qu'est-ce qui explique au niveau cérébral cette difficulté ? Comment les enseignants peuvent-ils favoriser le développement du cerveau de leurs élèves afin de les aider à apprendre ces concepts scientifiques difficiles à acquérir ? Ces questions sont posées par un domaine de recherche en émergence que nous appelons la neurodidactique des sciences.

Le but de cet article est double. D'une part, il vise à définir un domaine de recherche qui étudie la question de l'apprentissage et l'enseignement de concepts scientifiques selon une approche neuroscientifique (qui tient compte du cerveau) : la neurodidactique des sciences. D'autre part, il vise à présenter les premiers résultats intéressants de cette approche pour l'enseignement des sciences.

Une mise en garde est de mise cependant : « Ce serait une erreur que de promettre ou d'espérer trop, trop vite » (OCDE, 2002, p. 32). Cet article n'a pas la prétention de fournir un modèle neuroscientifique de l'apprentissage des sciences applicables directement dans les salles de classe, ni de proposer des recettes pédagogiques découlant des recherches en neurodidactique des sciences. Il vise simplement à familiariser le lecteur avec un domaine de recherche encore à construire, mais dont les répercussions éventuelles pour l'enseignement des sciences peuvent être considérables.

1. Qu'est-ce que la neurodidactique des sciences ?

Avant de discuter des premières expériences neuroscientifiques sur l'apprentissage des sciences, cette première section propose de définir ce qu'est la neurodidactique des sciences en la situant par rapport aux autres domaines de recherche qui étudient les relations entre le fonctionnement du cerveau et l'éducation.

1.1. Neuroéducation

À la fin des années 1990, alors que certains chercheurs affirmaient déjà que le domaine de l'éducation ne pouvait plus ignorer l'émergence des nouvelles connaissances sur le fonctionnement du cerveau (Byrnes et Fox, 1998), d'autres affirmaient le contraire. Bruer (1997, p. 4, traduction libre), dans un article intitulé *Education and the Brain : A Bridge Too Far,* écrit : « Les applications pédagogiques de la science du cerveau viendront éventuellement, mais tel quelle est maintenant la neuroscience n'a que peu à offrir aux enseignants quant aux pratiques d'enseignement en classe. » Selon Bruer, seule la psychologie cognitive peut, à l'heure actuelle, guider les pratiques pédagogiques à cause de ce « bridge too far ».

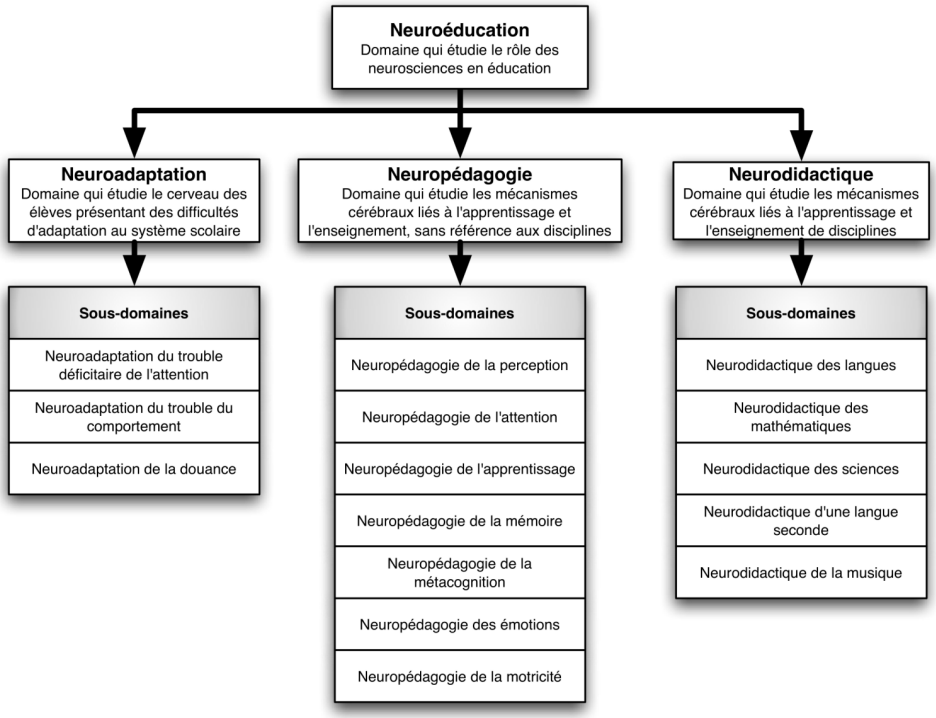
Aujourd'hui, la plupart des chercheurs s'opposent aux arguments de Bruer et affirment qu'un dialogue est possible et souhaitable entre les neurosciences et le domaine de l'éducation (Geake et Cooper, 2003 ; Goswami, 2004 ; Pettito et Dunbar, 2004). En 2002, l'OCDE a d'ailleurs publié un ouvrage intitulé *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage* qui examine le rôle des neurosciences en éducation et qui conclut que :

> des recherches ayant pour but la compréhension de l'apprentissage et menées dans cette perspective [neuroscientifique] peuvent indiquer certaines directions aux spécialistes, aux décideurs politiques et aux praticiens de l'éducation qui souhaitent un enseignement et un apprentissage mieux informés. […] Il n'y a aucun doute que « l'apprentissage et le cerveau » doit être une question prioritaire pour les pays de l'OCDE aujourd'hui et dans les années à venir. (p. 95-96)

Le « bridge too far » dénoncé par Bruer (1997) entre neuroscience et éducation est aujourd'hui considérablement réduit (Pettito et Dunbar, 2004 ; Geake, 2003) grâce notamment à l'émergence des neurosciences cognitives. À l'aide des nouvelles technologies d'imagerie cérébrale, les neuroscientifiques de la cognition sont en mesure d'étudier les régions du cerveau qui sont activées lors de l'exécution de tâches motrices ou cognitives. Puisque les neurones accomplissant une même fonction semblent avoir tendance à être regroupés dans le cerveau (ce que les neuroscientifiques nomment la localisation ou spécialisation fonctionnelle), l'activité cérébrale de différentes régions du cerveau peut souvent être corrélée avec certaines des fonctions cognitives reliées, par exemple, à la vision, au langage et à la mémoire. Ainsi, la neuroscience cognitive rapproche la neuroscience et le domaine de l'éducation en faisant le lien entre le niveau cellulaire (neurone, synapse, potentiel d'action, etc.) et le niveau cognitif (perception, attention, langage, etc.).

FIGURE 1

Principaux domaines de recherche en neuroéducation



Plus que jamais, la neuroscience peut jouer un rôle dans le domaine de l'éducation. À l'instar de Pettito et Dunbar (2004) qui utilisent le terme « educational neuroscience », nous proposons d'appeler « **neuroéducation** » le vaste domaine de recherche qui se situe à l'intersection de la neuroscience cognitive et du domaine de l'éducation et qui étudie le rôle des connaissances sur le fonctionnement du cerveau en éducation. De plus, nous proposons de regrouper les recherches en neuroéducation en au moins trois domaines : (1) la neuroadaptation scolaire, (2), la neuropédagogie et (3) la neurodidactique. Dans la prochaine section, il sera question de ces trois domaines de recherche. Lors de la discussion sur la neurodidactique, le concept de neurodidactique des sciences sera défini.

1.2. Domaines de recherche en neuroéducation

Un premier domaine de recherche, la **neuroadaptation scolaire,** étudie le cerveau des élèves éprouvant des difficultés d'adaptation au système scolaire. Ces difficultés peuvent être de plusieurs ordres. Par exemple, le Groupe de recherche sur le trouble déficitaire de l'attention/hyperactivité dirigé par Hélène Poissant, professeure au Département d'éducation et pédagogie de l'Université du Québec à Montréal, étudie les différences cérébrales entre les élèves atteints du trouble déficitaire de l'attention et ceux qui n'en sont pas atteints. D'autres chercheurs, comme John Geake (à paraître) professeur d'éducation au *Westminster Institute of Education* de l'*Oxford Brookes University*, s'intéressent aux particularités cérébrales des enfants qui sont doués dans certains domaines d'apprentissage. Dans quelques années, ces recherches permettront de mieux comprendre pourquoi certains élèves souffrent de difficultés particulières et comment les enseignants peuvent les aider.

Contrairement à la neuroadaptation qui étudie le cerveau des élèves ayant des difficultés particulières, la **neuropédagogie** est un domaine de recherche plus général qui étudie les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'enseignement. Les fonctions cognitives liées à l'apprentissage et l'enseignement (perception, attention, mémoire, etc.) ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches

en neuroscience cognitive. Ces recherches ont entre autres démontré que le cerveau est plastique à l'apprentissage (OCDE, 2002), c'est-à-dire que tout au long de leur vie, les milliards de connexions neuronales du cerveau changent lorsqu'on apprend. Ce domaine de recherche se questionne également sur l'existence ou non de périodes sensibles durant lesquelles certains apprentissages se réalisent plus facilement (Goswami, 2004 ; OCDE, 2002).

Alors que la neuropédagogie s'intéresse aux processus généraux d'apprentissage et d'enseignement, la **neurodidactique** s'intéresse aux mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'enseignement de disciplines scolaires. À titre d'exemple, la neurodidactique des langues s'intéresse à la façon dont le cerveau comprend et produit le langage afin de mieux cerner les meilleures méthodes d'enseignement. La neurodidactique des mathématiques s'intéresse pour sa part à la façon dont sont représentés les nombres dans le cerveau et aux façons dont le cerveau effectue des calculs (Butterworth, 2005 ; Pesenti, Thioux, Seron et De Volder, 2000 ; Zago, Pesenti, Mellet, Crivello, Mazoyer et Tzourio-Mazoyer, 2001).

La **neurodidactique des sciences** est un domaine de recherche de la neurodidactique (et donc de la neuroéducation) qui étudie les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et à l'enseignement des sciences. Parmi les questions à l'étude, on retrouve :

- Quelle est l'influence de l'éducation scientifique sur le cerveau ?
- Existe-t-il des périodes sensibles pour apprendre les sciences ?
- Pourquoi certains élèves ont-ils de la difficulté à apprendre les sciences, alors que cela semble facile pour d'autres ?
- Quelles sont les meilleures façons d'enseigner les sciences ?
- Pourquoi, de façon générale, certains concepts scientifiques sont très difficiles à apprendre et que certaines conceptions erronées persistent même après avoir suivi un ou plusieurs cours de sciences ?

2. Quelles sont les premières découvertes réalisées en neurodidactique des sciences ?

Jusqu'à présent, seulement deux recherches ont été menées en neurodidactique des sciences. Les résultats de ces recherches sont discutés dans cette section. La première de ces recherches porte sur une stratégie d'enseignement répandue en enseignement des sciences, le conflit cognitif, qui consiste à présenter aux élèves des informations qui contredisent leurs conceptions afin de les amener à réaliser un changement conceptuel. La deuxième s'intéresse aux effets de l'éducation scientifique sur le cerveau et vise à comprendre pourquoi il est si difficile de changer certaines conceptions, c'est-à-dire de réaliser un changement conceptuel.

2.1. Découverte à propos du conflit cognitif

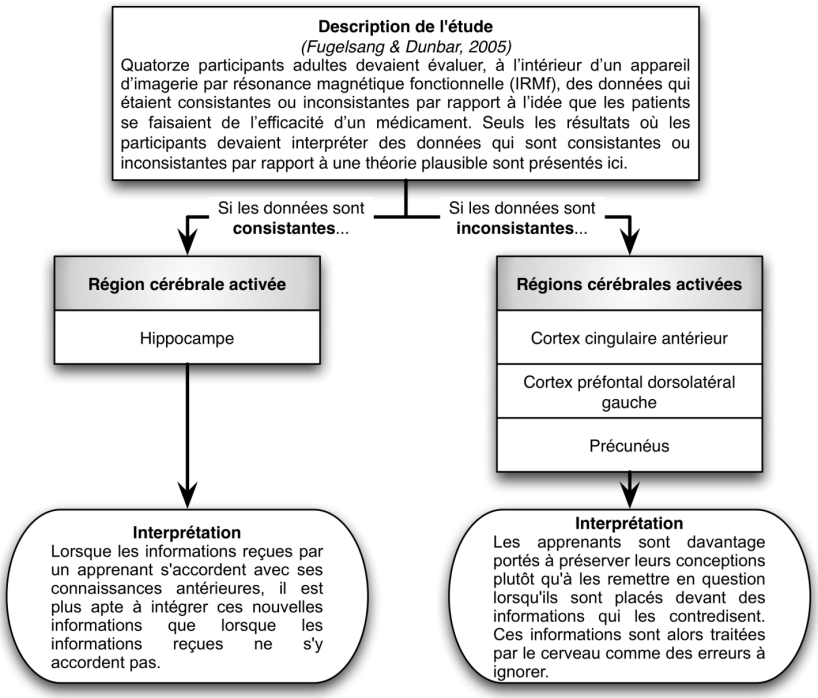
Dans une partie[1] de la première recherche (Dunbar, Fugelsang et Stein, à paraître ; Fugelsang et Dunbar, 2005 ; Petitto et Dunbar, 2004), quatorze participants adultes devaient évaluer, à l'intérieur d'un appareil d'IRMf, des données qui étaient en accord (consistantes) ou en désaccord (inconsistantes) avec l'idée que les participants se faisaient de l'efficacité d'un médicament. Les résultats de cette recherche montrent que lorsque les données qui leur sont présentées sont consistantes avec leur idée initiale, les participants activent leur hippocampe, une partie du cerveau associée à l'apprentissage et à la mémoire. Lorsque les données sont inconsistantes avec leur idée initiale (c'est-à-dire lorsqu'on cherche à provoquer un conflit cognitif chez le participant), ce sont plutôt le cortex cingulaire antérieur (une région cérébrale associée à la détection d'erreur et à la gestion de conflits) (Botvinick, Carter. Braver, Barch et Cohen, 2001), le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (pouvant jouer un rôle dans certains processus d'inhibition), ainsi que le précunéus (détenant probablement un rôle prédominant dans la réallocation des ressources reliées à l'attention) qui sont davantage activés.

1. Une autre partie de la recherche consistait à vérifier la différence d'activité cérébrale entre l'évaluation d'une théorie plausible et d'une théorie non plausible, mais elle n'est pas discutée ici, n'étant pas en lien direct avec l'objet du présent article.

Pour l'enseignement, cette recherche est intéressante, parce qu'elle remet en question le rôle du conflit cognitif en enseignement des sciences. D'une part, il semblerait que les élèves intègrent plus facilement les informations qui sont consistantes avec leurs connaissances antérieures (Fugelsang et Dunbar, 2005, p. 1209). D'autre part, le conflit cognitif ne provoquerait pas une activité cérébrale susceptible d'engendrer d'emblée des apprentissages (Pettito et Dunbar, 2004, p. 12), puisque les informations présentées sont traitées comme des erreurs puis ignorées par le cerveau des participants. Cela ne signifie pas cependant que le conflit cognitif est une méthode d'enseignement inefficace dans toutes les situations. En fait, la recherche de Fulgelsang et Dunbar (2005) démontre que, dans cette situation d'apprentissage précise (évaluation de données inconsistantes avec l'idée que les sujets se font de l'efficacité d'un médicament), le conflit cognitif basé sur la présentation de données inconsistantes n'est sans doute pas la voie à privilégier. Pour d'autres situations d'enseignement (apprentissage du concept de force, apprentissage du concept de courant électrique, etc.), les résultats pourraient être différents.

FIGURE 2

Le rôle du conflit cognitif remis en question



2.2. Découverte à propos du rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences

Prenant appui sur cette première recherche démontrant qu'il est difficile de produire un changement conceptuel en présentant seulement des données inconsistantes aux participants, Fugelsang et Dunbar ont cherché à comprendre ce qui se produit dans le cerveau lorsque quelqu'un réalise un changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, à paraître ; Fugelsang et Dunbar, en préparation ; Pettito et Dunbar, 2004). Pour ce faire, ils ont analysé les différences au niveau cérébral entre des participants adultes n'ayant pas réalisé de changement conceptuel en physique mécanique (participants novices) et des participants adultes ayant suivi plusieurs cours de sciences et réalisé un changement conceptuel (participants experts). Dans un appareil d'IRMf, les participants devaient dire si les films présentés sur un écran (deux balles qui tombent) étaient conformes ou non à ce qu'on pourrait observer s'il n'y avait aucune résistance de l'air. Deux types de films ont été présentés aux participants, soient les films naïfs qui ne respectent pas les lois du mouvement de Newton (les balles plus grosses tombent plus vite) et les films newtoniens qui se conforment aux lois du mouvement de Newton (les balles plus grosses tombent à la même vitesse que les balles plus petites).

Les résultats de la recherche montrent que le cerveau des participants novices en mécanique active le cortex cingulaire antérieur (associé à la détection d'erreur) lorsqu'ils regardent les films newtoniens, alors qu'il n'active pas cette région cérébrale pour les films naïfs. Pour ces participants, les films newtoniens ne sont donc pas conformes à ce qui devrait arriver dans un monde sans résistance de l'air et sont traités par le cerveau comme des erreurs. Comme on pourrait s'y attendre, les participants experts en mécanique activent leur cortex cingulaire antérieur lorsqu'ils voient des films naïfs (parce que leur cerveau traite ces films comme des erreurs). Ce qui est plus surprenant cependant – et plus important pour l'étude du changement conceptuel –, c'est que les participants experts activent leur cortex cingulaire antérieur, non seulement lorsqu'ils voient des films naïfs, mais aussi lorsqu'ils

voient des films newtoniens (les novices n'activent leur cortex cingulaire antérieur que lors du visionnement de films newtoniens). Le cerveau des experts se comporte donc comme si les films newtoniens étaient des erreurs (puisque le cortex cingulaire antérieur est activé), malgré le fait que ces mêmes experts affirment être d'accord avec l'exactitude de ces films newtoniens. Ce résultat laisse suggérer que le cerveau des scientifiques interagit de façon semblable à celui des non-scientifiques au visionnement de films newtoniens (probablement parce que les participants scientifiques ont déjà pensé, eux aussi, que les objets plus lourds tombent plus vite). Cependant – et c'est ce qui différencie les novices des experts –, le cerveau des scientifiques semble réussir à inhiber la réponse spontanée selon laquelle les films newtoniens sont erronés pour ensuite être capable de formuler une réponse plus valable du point de vue scientifique (c'est-à-dire affirmer que les films newtoniens sont exacts). Cette analyse laisse donc entendre que les participants scientifiques doivent **inhiber plutôt qu'effacer ou restructurer leurs connaissances antérieures** afin de réussir un changement conceptuel, ce qui modifie considérablement notre façon de concevoir le changement conceptuel :

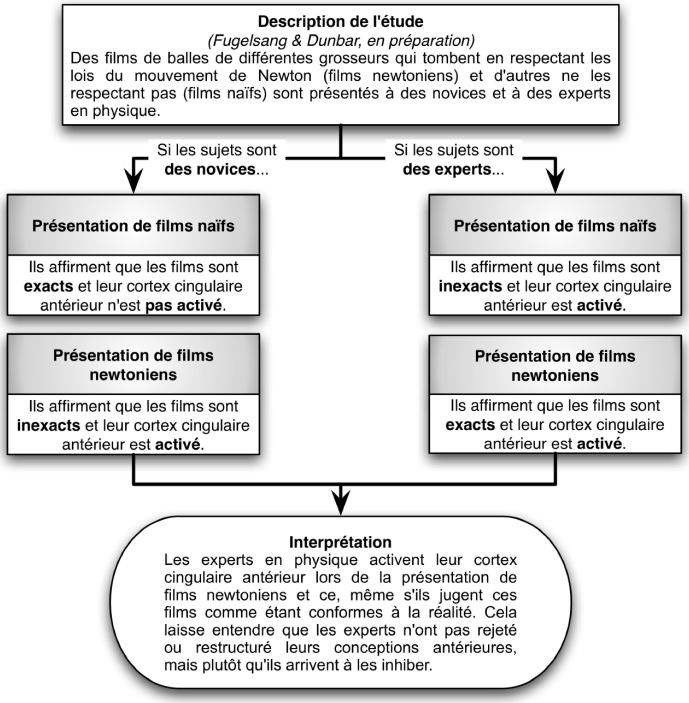
> Plusieurs théoriciens du domaine de l'éducation voient la réorganisation conceptuelle comme étant le but principal de l'éducation et voient le changement conceptuel d'une façon telle que les élèves ne seront plus capables de conceptualiser leurs anciennes théories suite à un changement conceptuel (la notion d'incommensurabilité de Kuhn). Cependant, les résultats des expériences rapportées dans ce chapitre indiquent que, même quand le changement conceptuel semble avoir eu lieu, les élèves ont encore accès à leurs anciennes théories naïves et que ces théories semblent avoir été activement inhibées plutôt que réorganisées et absorbées dans une nouvelle théorie. (Dunbar, Fugelsang et Stein, à paraître, p. 8, traduction libre)

Cette perspective du changement conceptuel dans laquelle l'inhibition jouerait un rôle dans l'acquisition de certains concepts scientifiques est prometteuse et nécessite davantage de recherche. Grâce aux travaux de Fugelsang et Dunbar (en préparation), il est possible d'émettre l'hypothèse de recherche selon laquelle l'inhibition est un mécanisme cérébral jouant un rôle dans les processus de changement conceptuel. Mais, une question importante demeure :

l'inhibition joue-t-elle un rôle dans l'acquisition d'autres concepts scientifiques? Fugelsang et Dunbar (en préparation) n'ont étudié les différences cérébrales entre l'expert et le novice que pour une conception bien précise: l'effet de la masse sur la chute des objets. Pourtant, les conceptions des élèves sont très nombreuses (Thouin, 1996). L'inhibition est-elle en jeu dans toutes ces conceptions? Si elle ne l'est pas, qu'est-ce qui distingue une conception nécessitant une inhibition d'une conception n'en nécessitant pas?

FIGURE 3

Rôle de l'inhibition dans les processus de changement conceptuel



Conclusion

Avec les nouvelles possibilités offertes par l'imagerie cérébrale, de plus en plus d'études portant sur la neuroadaptation scolaire, la neuropédagogie et la neurodidactique voient et verront le jour. Bien qu'il faille demeurer critique par rapport aux implications hâtives des neurosciences en éducation, on peut également être optimiste pour l'avenir:

> Durant les décennies à venir, nous pouvons nous attendre à commencer à démêler les complexités du cerveau et à comprendre enfin la nature de la mémoire et de l'intelligence (par exemple), ainsi que ce qui se passe exactement durant le processus d'apprentissage. Nous serons alors en mesure de refonder notre pratique de l'éducation sur une théorie solide de l'apprentissage. (OCDE, 2002, p. 30)

Pour l'enseignement des sciences, l'idée que le changement conceptuel repose peut-être davantage sur un processus d'inhibition que sur un processus de restructuration des connaissances antérieures est particulièrement intéressante. Il est souhaitable que les recherches à venir en neurodidactique des sciences se penchent sur l'importance de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences, puis sur les façons d'enseigner susceptibles de favoriser cette inhibition.

En terminant, citons un scénario futuriste imaginé par Geake et Cooper (2003, p. 17, traduction libre) sur ce que peut devenir l'école de demain qui intégrerait les connaissances développées en neuroéducation :

> La scène se déroule lors d'une rencontre de parents dans une école primaire du quartier. Un parent discute avec l'enseignant de son enfant, Chris, des mauvais résultats scolaires en mathématiques de ce dernier. L'enseignant affirme alors que les mauvais résultats en mathématiques de Chris sont sous surveillance depuis un moment et qu'à cet effet, l'enseignant a demandé un rapport de neuroimagerie [...] Après l'analyse de ce rapport, l'enseignant recommande un cours de biofeedback en temps réel impliquant l'utilisation de problèmes arithmétiques à étapes multiples pour renforcer la mémoire à court terme liée à la résolution de problèmes numériques de Chris, laquelle s'est révélée relativement faible suite à l'imagerie. Les rapports de neuroimagerie des prochains mois diront si cette intervention spécifique a été efficace...

Ce scénario, qui nous paraît encore bien lointain, contient peut-être quelques-uns des éléments qui constitueront l'école de demain. Il faut donc s'y préparer maintenant.

Enseignants de sciences, avez-vous essayé ceci?

Si les conceptions des élèves sont si difficiles à changer, c'est peut-être parce qu'elles reposent sur des réseaux de neurones très bien établis et qui s'activent facilement. Pour apprendre les sciences, les élèves doivent réussir à inhiber ces réseaux neuronaux, c'est-à-dire réussir à ne pas les activer. Ce processus d'inhibition peut être long et difficile à réaliser. Pour expliquer aux élèves pourquoi il est difficile d'apprendre les sciences et d'inhiber leurs conceptions antérieures, donnez-leur le devoir de changer une habitude qui est particulièrement ancrée en eux (il peut s'agir d'une habitude que vous n'aimez pas!). Par exemple, ils peuvent essayer de ne plus utiliser une expression qu'ils utilisent fréquemment (jurons, anglicismes, etc.) ou bien essayer de ne plus faire certains gestes (ne plus prendre un crayon de la main qui écrit habituellement, ne plus tendre votre main droite pour serrer la main mais tendre le coude gauche, etc.). Le devoir peut également toucher l'utilisation inappropriée de termes scientifiques dans le langage quotidien. Par exemple, ne plus dire que le froid entre dans la maison…

Bibliographie

Botvinick, M.M., Braver, T.S., Barch, D.M., Cohen, J.D. et Carter, C.S. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review,* 108(3), 634-652.

Bruer, J.T. (1997). Education and the Brain: A Bridge Too Far. *Educational Researcher,* 26(8), 4-16.

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry,* 46(1), 3-18.

Byrnes, J.P. et Fox, N.A. (1998). The educational relevance of research in cognitive neuroscience. *Educational Psychology Review,* 10(4), 297-342.

diSessa, A.A. (2006). A history of conceptual change research: threads and fault lines. In R.K. Sawyer, *Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 265-281.

Dunbar, K.N., Fugelsang, J.A. et Stein, C. (à paraître). Do naïve theories ever go away ? Using brain and behavior to understand changes in concepts. In M.C. Lovett et P. Shah, *Thinking with Data : 33rd Carnegie Symposium on Cognition*. Mahwah, NJ : Erlbaum. Disponible sur Internet : http://www.dartmouth.edu/~kndunbar/pubpdfs/DunbarCarnegieRev.pdf, 1-11 (consulté le 28 mars 2007).

Fugelsang, J.A. et Dunbar, K.N. (2005). Brains-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia,* 43, 1204-1213.

Geake, J. et Cooper, P. (2003). Cognitive neuroscience : implications for education. *Westminster Studies in Education,* 26(1), 7-20.

Geake, J.G. (2003). Adapting Middle Level educational practices to current research on brain functioning. *Journal of the New England League of Middle Schools,* 15(2), 6-12.

Geake, J.G. (à paraître). The Neuropsychology of Giftedness. In (Ed). In L.V. Shavinina (Ed.), *International Handbook of Giftedness* : Springer.

Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology,* 74(1), 1-14.

OCDE (2002). *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.

Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X. et De Volder, A. (2000). Neuroanatomical substrates of arabic number processing, numerical comparison, and simple addition : a pet study. 12(3), 461-479.

Pettito, L.-A. et Dunbar, K. (2004). *New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind.* Paper presented at the Conference on Building Usable Knowledge in Mind, Brain, & Education, Havard Graduate School of Education.

Thouin, M. (1996). *Les conceptions des élèves et les activités d'apprentissage en sciences de la nature au primaire*. Montréal : Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal.

Zago, L., Mauro, P., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural Correlates of Simple and Complex Mental Calculation. *NeuroImage,* 13, 314-327.